

## 論文の内容の要旨

論文題目	Quarter-wave SIR Based Wide-stopband Microstrip Bandpass Filter and Its Application to Balun-filter ( $\lambda/4$ ステップインピーダンス共振器を用いた広い阻止帯域を有するバンドパスフィルタ及びそのバランフィルタへの応用)
学位申請者	易 龍飛 (Longfei Yi)

人々の生活に無線通信が不可欠なものとなっており、電波を利用した無線通信規格が多くなり、それに伴い空間中の電磁環境もより複雑化している。小電力信号を扱う電子回路では、装置等から受ける高調波の影響によって誤動作等が発生する可能性があり、それらを防ぐために古くからフィルタ、バラン等の高周波回路の研究開発が活発に行われてきた。

電子回路で発生する高調波は非常に広帯域に及び、フィルタにより所望の信号を通過させ、それ以外の遮断域では信号を減衰させることが重要であり、遮断域の周波数幅が可能な限り広いことが求められる。しかし、先行研究では、遮断域での信号が  $-20$  dB以下となる周波数帯域幅を示す、 $20$  dB阻止帯域幅はフィルタの動作周波数の  $550$  MHzに対して、遮断域の上限周波数は  $9.9$  GHz、すなわち  $18$ 倍が限界であることが一例として示されている。携帯電話の規格の一つである GSM850や第5世代 (5G) 規格等においてもフィルタの  $20$  dB阻止域幅は、フィルタの通過帯域上限周波数に対して  $20$ 倍以上が今後求められる可能性がある。その理由は  $3.5$  GHz以上の帯域に各種レーダ、無線LAN、衛星通信等、他の無線通信規格が配置されているためである。5Gの動作周波数の一つである  $3.5$  GHzに対して、 $70$  GHzまで不要信号を  $-20$  dB以下とする必要があることを意味する。

ステップインピーダンス比  $R_z$  (Stepped Impedance Resonator: SIR) を用いることで  $20$  dB阻止帯域幅を広くすることを検討する。 $\lambda/4$  SIRをフィルタ設計に適用する際に、基本共振、高次共振を含めた共振特性について理論計算、回路シミュレーションにより詳細に検討する。シミュレーションで予測できない高次共振を抑圧するため、また、構造が対称形であると高次共振成分の影響が強くなることから非対称結合構造 (Asymmetric Coupling Structure: ACS) を採用する。遮断域に着目したACSの設計によりフィルタの高調波抑圧効果を高めるとともに構造の小型化を実現する。さらに、遮断域での高調波共振応答の出現位置の制御と抑圧効果をより高めるため一端開放スタブを装荷する。一端開放スタブを SIR に装荷することで高調波のみを効果的に抑圧することができる可能性はあるが、

フィルタの通過帯域への影響調査が不十分であるため、フィルタの設計パラメータの一つである、外部 $Q$ 値 ( $Q_e$ ) に焦点を当て、回路理論をもとに検証する。理論計算により基本形状を設計し、電磁界シミュレータを用いた詳細設計により回路サイズが $0.177 \times 0.082 \lambda_g^2$  ( $\lambda_g$ はフィルタの中心周波数における管内波長) となるバンドパスフィルタが設計できた。設計の有効性を確認するために試作、測定を行ったところ、電磁界シミュレーション結果とほぼ同等な特性を得た。先行研究と比較すると、提案したフィルタの20 dB阻止帯域幅は先行研究では18倍に対して20倍に改善することができ、17.6 GHz (K-band) までの高調波抑圧量を20 dB以上とすることができた。さらに、構築した設計手法を適用した5G用フィルタにおいても、20 dB阻止帯域の上限周波数が70 GHzとなるフィルタが設計できた。本手法はフィルタの通過帯域の周波数に依らず、汎用的な設計手法であることを示した。

また、伝送線路固有の特性である高調波を抑制するために用いられるバランの設計についても検討した。通常の設計法では結合線路の端部で結合させるため、バランの設計パラメータの一つである結合度の所望の値が条件によっては実現できない問題がある。この問題に対して、新たにピア接続結合構造 (Via Connection Coupling Structure: VCCS) を提案する。本論文では準静電界モデルを提案して電界分布を制御することにより結合構造の偶モード及び奇モードの等価静電容量、特性インピーダンスを制御できる。VCCSを用いない従来のマイクロストリップ結合線路構造から得られる $C$ と比較するとVCCSの $C$ は11 dB以上強結合にできることが分かった。また、VCCSを用いることで基板厚と基板の比誘電率の制約を緩和することができ、バランの設計自由度を劇的に向上させることができた。さらに、強い結合で不平衡信号を平衡信号に変換した場合に優れた位相及び振幅バランス性能を示した。VCCSの初期設計条件はピアの数が多いため、試作プロセスが複雑となる。そこで、性能を保ちつつ回路構造を簡素化するために回路パラメータを変化させて電磁界シミュレーションを行った。VCCSを用いたバランの回路パラメータの一部である、ピア間距離、ピアの数に対する周波数特性の変化を調査し、良好な周波数特性が得られる条件を明らかにした。さらに、反射特性改善のため、結合構造部にステップインピーダンス線路を用いたステップインピーダンスバラン (SIB) を提案した。反射特性が改善し、回路構造が小型となったが、アイソレーション特性が劣化したため、アイソレーション回路を組み合わせることで高いアイソレーション特性も併せ持つSIBが設計できた。

最後に、提案したバンドパスフィルタ及びSIBを接続してバンドパス特性とバラン機能を有するバランフィルタを設計した。提案のバランフィルタの減衰量は28 dBに改善することができ、18 GHzまでの高調波に対して高い抑圧効果が得られることを確認した。

# 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 易 龍飛 (Longfei Yi)

審査委員主査 和田 光司

委員 肖 鳳超

委員 安藤 芳晃

委員 萱野 良樹

委員 小野 哲

電波を利用した無線通信規格が多くなり、それに伴い電磁環境もより複雑化している。電子回路等で発生する高調波は広周波数帯域に及ぶ。そこでフィルタにより所望の信号を通過させ、それ以外の遮断域では信号を減衰させることが重要であり、特性として遮断域の周波数幅が可能な限り広いことが求められる。しかし、先行研究の一例によると、遮断域での信号が  $-20$  dB以下となる周波数帯域幅を示す、 $20$  dB阻止帯域幅はフィルタの動作周波数の $550$  MHzに対して、遮断域の上限周波数は $9.9$  GHz、すなわち $18$ 倍が限界であることが示されている。携帯電話の規格の一つであるGSM850や第5世代(5G)規格においても、フィルタの $20$  dB阻止域幅は、フィルタの通過帯域上限周波数に対して $20$ 倍以上が求められる可能性がある。

本論文は4つの章から構成されている。第1章では研究の背景、研究目的および論文構成について述べている。

第2章ではフィルタの構成要素である共振器に、特性インピーダンス比 $R_z$ を非常に低く設定した $\lambda/4$ ステップインピーダンス共振器 (Stepped Impedance Resonator: SIR) を用いることで $20$  dB阻止帯域幅の広帯域化の実現について述べている。 $\lambda/4$  SIRをフィルタ設計に適用する際に、基本共振、高次共振を含めた共振特性について理論計算、回路シミュレーションにより詳細に検討する。シミュレーションで予測できない高次共振を抑圧するため、また、構造が対称形であると高次共振成分の影響が強くなることから非対称結合構造 (Asymmetric Coupling Structure: ACS) を採用する。遮断域に着目したACSの設計によりフィルタの高調波抑圧効果を高めるとともに構造の小型化を実現する。さらに、遮断域での高調波共振応答の出現位置の制御と抑圧効果をより高めるため一端開放スタブを装荷する。一端開放スタブはSIRに装荷することで高調波のみを効果的に抑圧することができる可能性はあるが、フィルタの通過帯域への影響調査が不十分であるため、フィルタの設計パラメータの一つである、外部 $Q$ 値 ( $Q_e$ ) に焦点を当て、回路理論をもとに検証する。理論計算により基本形状を設計し、電磁界シミュレータを用いた詳細設計により回路サイズが $0.177 \times 0.082 \lambda_g^2$  ( $\lambda_g$ はフィルタの中心周波数における管内波長) となるバンドパスフィルタが設計できた。

設計の有効性を確認するために試作、測定を行ったところ、電磁界シミュレーション結果とほぼ同等な特性を得た。先行研究と比較すると、提案したフィルタの20 dB阻止帯域幅は先行研究では18倍に対して20倍に改善することができ、17.6 GHz (K-band) までの高調波抑圧量を20 dB以上とすることができた。また、本回路構造は阻止帯域幅が広い、以上の結果より20 dB阻止帯域幅が広く、小型で試作が容易なバンドパスフィルタを実現した。

さらに、構築した設計手法を適用した5G用フィルタにおいても、20 dB阻止帯域の上限周波数が70 GHzとなるフィルタが設計できた。本手法はフィルタの通過帯域の周波数に依らず、汎用的な設計手法であることを示した。

第3章では、小型バランと第2章で検討した広い20 dB阻止帯域幅を有するバンドパスフィルタにより構成したバランフィルタについて検討を行った。従来の平面型バランの設計ではマイクロストリップ結合線路の端部で結合させるため、バランの設計パラメータの一つである結合度 $C$ の所望の値が条件によっては実現できない場合がある。この問題に対して、新たにピア接続結合構造 (Via Connection Coupling Structure: VCCS) を提案する。準静電界モデルを提案して電界分布を制御することにより結合構造の偶モード及び奇モードの等価静電容量、特性インピーダンスを制御できる。VCCSを用いない従来のマイクロストリップ結合線路構造から得られる $C$ と比較するとVCCSの $C$ は11 dB以上強結合にできることが分かった。また、VCCSを用いることで基板厚と基板の比誘電率の制約を緩和することができ、バランの設計自由度を劇的に向上できた。さらに、強い結合で不平衡信号を平衡信号に変換した場合に優れた位相及び振幅バランス性能を示した。VCCSの初期設計条件はピアの数が多いため、試作プロセスが複雑となる。そこで、性能を保ちつつ回路構造を簡素化するために回路パラメータを変化させて電磁界シミュレーションを行った。VCCSを用いたバランの回路パラメータの一部である、ピア間距離、ピアの数に対する周波数特性の変化を調査し、良好な周波数特性が得られる条件を明らかにした。さらに、反射特性改善のため、結合構造部にステップインピーダンス線路を用いたステップインピーダンスバラン (SIB) を提案した。反射特性が改善し、回路構造が小型となったが、アイソレーション特性が劣化したため、アイソレーション回路を組み合わせることで高いアイソレーション特性も併せ持つSIBが設計できた。提案されたフィルタ及びSIBを接続してバンドパス特性とバラン機能を有するバランフィルタを設計した。最新先行研究のバランフィルタの阻止帯域の上限値は動作周波数の20倍で減衰量は18.5 dBであったが、提案したバランフィルタの減衰量は18 GHzまで28 dBに改善することができ、高い抑圧効果が得られることが分かった。

第4章では研究全体のまとめについて述べている。

本研究に関して、以上の内容の発表に対して質疑応答を行い、同時に申請者の研究に対する資質、能力、基礎学力について総合的に評価を行った。その結果、申請者が研究を推進する能力を十分有すること、また工学的な立場から詳細に論文を記述していることを確認した。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として十分な価値を有するものと認める。